

Caracterización geomorfológica y hábitats en estructuras volcánicas en el Campo Profundo de Expulsión de Fluidos (NE del Golfo de Cádiz)

Geomorphological characterization and habitats in volcanic structures in the Deep Field of Fluid Expulsion (NE Gulf of Cádiz)

D. Palomino¹, J.T. Vázquez¹, N. López-González¹, L.M. Fernández-Salas², J.L. Rueda¹, E. González-García³ y V. Díaz-del-Río¹

¹ Instituto Español de Oceanografía. CO de Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640, Fuengirola (Málaga) desiree.palomino@gmail.com

² Instituto Español de Oceanografía. CO de Cádiz, Muelle Pesquero s/n, 11006, Cádiz (Cádiz)

³ Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071, Málaga (Málaga)

Resumen: Se ha analizado la morfología del fondo, las características sub-superficiales y los hábitats bentónicos de un sector del talud continental del Golfo de Cádiz. El objetivo es reconocer los tipos morfológicos y los procesos geológicos y oceanográficos para entender la relación con dichos procesos, así como su influencia sobre los hábitats y las especies bentónicas asociadas. Se han estudiado las características morfológicas, el tipo de sedimento y las especies bentónicas dominantes en cuatro estructuras volcánicas y en los fondos marinos adyacentes. Los tipos morfológicos identificados se han agrupado en formas relacionadas con escapes de fluidos desde el subsuelo, con corrientes de fondo, con movimientos en masa, formas estructurales y biogénicas. Además, se han identificado las especies bentónicas dominantes y asociadas a escapes de fluidos, a sustratos duros (costras de carbonatos autigénicos) y a sustratos blandos. Los principales factores que controlan la morfología y las comunidades bentónicas asociadas son los procesos relacionados con escapes de fluidos, aunque existen otros procesos, como los gravitacionales, y las propiedades de las masas de agua profunda. Los sedimentos de brecha fangosa y los organismos quimiosimbióticos se localizan principalmente en la cima de los edificios volcánicos, indicando que la actividad de expulsión de fluidos podría ser elevada en algunos casos. La presencia de coladas de fango y cuerpos lóbulados sobre los flancos son indicativos de un proceso de extrusión que tuvo lugar en diferentes fases. Los carbonatos autigénicos se han localizado en los flancos y en la base de las estructuras volcánicas y están relacionados con una actividad de expulsión de fluidos moderada, siendo desenterrados por la actividad de las corrientes de fondo y colonizados por especies de sustratos duros. Las depresiones en las zonas adyacentes están formadas por procesos de colapso, debido a escapes de fluido activos y bajo la influencia de las corrientes profundas.

Palabras clave: expulsión de fluidos, fauna quimiosimbionte, Golfo de Cádiz. volcanes de fango.

Abstract: Seabed morphology, sub-bottom characteristics and benthic habitats of a sector of the Gulf of Cadiz continental slope have been analyzed. The aim is to recognize morphological

features, geological processes and near-bottom water masses for understanding the relationships between the occurrence of fluid venting related edifices and their associated habitats and benthic communities. Morphological characteristics, sediment types and dominant benthic species of four volcanic structures and their adjacent areas have been studied. Identified morphological characteristics were grouped in fluid escape related features, bottom current features, mass movement features, structural features and biogenic related features. Additionally, dominant benthic species associated with seepage, hard substrates (authigenic carbonates) or soft bottoms have also been found in these features. A major factor controlling these features and their associated biota is mud flow and fluid-escape-related processes, although other factors such as gravitational and deep water masses related processes are involved. Mud breccia sediments and chemosymbiotic metazoans are mainly located at the summit indicating a higher mud flow and seepage activity. The presence of mass flows deposits and mud lobes on the flanks are indicative of mud extrusion process in different phases. Authigenic carbonates on the flanks and the base of the volcanic structures are related to a moderate seepage activity, being exhumed by bottom currents and colonized by hard substrate associated species. Adjacent depressions are linked to collapse processes, where active fluid escape and bottom current effects have been identified.

Key words: chemosymbiotic fauna, Gulf of Cadiz, mud volcanoes, seepage venting.

INTRODUCCIÓN

Los volcanes de fango son estructuras frecuentes en el Golfo de Cádiz y están relacionadas con la emisión de fluidos debida a la migración vertical de sedimentos fangosos con alto contenido en gases hidrocarburos expulsados por sucesivas emisiones (Milkov, 2000). En estos edificios se desarrollan diferentes hábitats que están condicionados por el tipo de sustrato, las masas de agua profundas y los procesos geológicos que tengan lugar tanto a nivel regional como local.

Se han realizado numerosos estudios centrados en los volcanes de fango, sobre la migración y emisión de fluidos en ellos y sobre la fauna bentónica asociada a dichas emisiones en el Golfo de Cádiz. Recientemente, los estudios presentan un enfoque multidisciplinar que permite entender la relación de los volcanes de fango con los procesos geológicos y oceanográficos, así como, con los hábitats y las comunidades bentónicas que se desarrollan como consecuencia de esta interacción (Palamino *et al.*, 2015).

El objetivo de este trabajo es el estudio de la morfología del fondo, de las características sub-superficiales y los hábitats de cuatro edificios volcánicos situados en el talud medio del Golfo de Cádiz para entender la interacción de estas estructuras con los procesos geológicos recientes y con las masas de agua, así como su influencia sobre la biota.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Golfo de Cádiz se sitúa en un contexto actual compresivo, donde se da el desarrollo de importantes fenómenos de diapirismo y vulcanismo de fango. Estos fenómenos están relacionados con el emplazamiento de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz (UAGC) entre el Oligoceno Tardío y el Tortonense, y con el desarrollo de complejos extensionales gravitacionales y zonas transpresivas entre el Messiniense y el Cuaternario, que favorecieron el ascenso de los materiales más plásticos de la UAGC en forma de estructuras diapíricas íntimamente relacionadas con la formación de los volcanes de

fango (Figura 1A). El área de estudio denominada Campo Profundo de Expulsión de Fluidos (CPEF, Díaz del Río *et al.*, 2014) se localiza entre 680 y 1200 m de profundidad, en un sector

del talud medio del margen español del Golfo de Cádiz caracterizado por depósitos fangosos que son atravesados por canales erosivos de dirección E-O y NE-SO (Figura 1B).

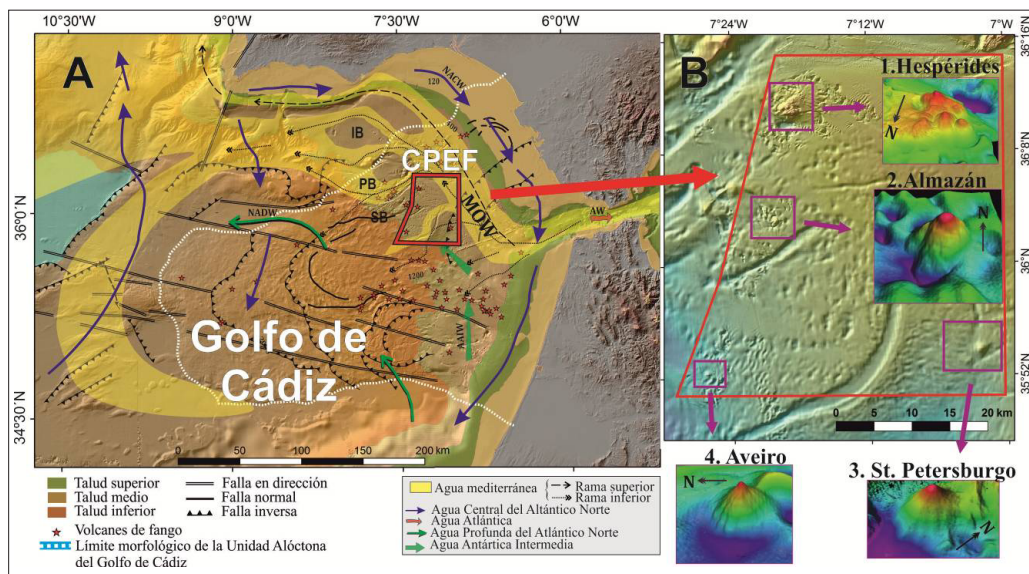


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio. A) Principales dominios fisiográficos, elementos tectónicos y principales masas de agua en el Golfo de Cádiz (rasgos tectónicos modificados de Medialdea *et al.*, 2004; Zitellini *et al.*, 2009; y masas de agua modificadas de Hernández-Molina *et al.*, 2014). B) Área de estudio localizada en un sector del talud medio y denominada Campo Profundo de Expulsión de Fluidos (CPEF) donde destacan los cuatro edificios volcánicos objeto de estudio

La circulación oceanográfica en el Golfo de Cádiz está controlada por el intercambio de masas de agua a través del Estrecho de Gibraltar, con un flujo de agua Atlántica de entrada (AIW) hacia el mar de Alborán y un flujo de agua Mediterránea de salida (MOW) hacia el Océano Atlántico. La MOW recorre el margen ibérico hacia el noroeste y se divide en dos núcleos principales. El área de estudio se encuentra bajo la influencia de una desviación de la rama inferior de la MOW que gira en una dirección NE-SO a su salida por el Estrecho de Gibraltar (Figura 1A). La velocidad de la corriente de fondo en el volcán St. Petersburg, al SE de la zona de estudio, oscilan entre

0,65 y 0,7 m/s, mientras que en los volcanes Almazán y Hespérides situados en el extremo occidental, fluctúan entre 0,5 y 0,56 m/s (Díaz del Río *et al.*, 2014).

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos analizados para la elaboración de este trabajo han sido obtenidos en el marco del proyecto LIFE+INDEMARES/CHICA en el CFEF (Figura 1). Se han utilizado datos batimétricos y de reflectividad de fondo que han sido procesados con el programa *Caris Hips and Sips* para crear modelos batimétricos a una resolución de 15 m. Para el análisis morfológico se ha utilizado el programa *Arc-*

GIS desktop. Se han analizado además perfiles sísmicos de muy alta resolución obtenidos con la sonda paramétrica TOPAS-PS18 que se convirtieron e importaron en formato SEG-Y y han sido interpretados mediante el programa *IHS Kingdom*. Se han analizado muestras de sedimento obtenidas con *box-corer* para caracterizar la textura del sedimento y la composición faunística, además se han realizado testigos de gravedad en la cima de dos de las estructuras volcánicas, que han servido para confirmar su naturaleza de volcán de fango. Los videos e imágenes obtenidos con VOR (Vehículo de Observación Remolcado) se han utilizado para identificar los hábitats y su biota asociada.

RESULTADOS

El CPEF es un sector morfológicamente complejo debido al efecto combinado de los procesos erosivos, gravitacionales y sedimentarios que tienen lugar en la zona. La zona se

caracteriza por un gran cuerpo sedimentario con forma de abanico que es atravesado por surcos erosivos y otras formas como campos de ondas de fango y arena, deslizamientos y relieves relacionados con la expulsión de fluidos como *pockmarks*, valles ciegos y edificios volcánicos. En relación con estos últimos, se ha podido diferenciar dos tipos de edificios. El primer tipo son los volcanes de fango (Almazán, St. Petersburg y Aveiro) que están constituidos por un cono simple, de forma más o menos circular en planta, y que muestran evidencias de extrusión de material. Su naturaleza de volcán de fango ha sido confirmada a partir de la presencia de depósitos de brecha fangosa. El segundo tipo, es un complejo diapiro/volcán (Hespérides) constituido por una elevación del fondo generada por diapirismo que alberga varios volcanes de fango en su cima, donde también se ha obtenido brecha fangosa. Las características morfológicas de todos estos edificios se han resumido en la Tabla I.

Nombre	Hespérides	Almazán	St. Petersburg	Aveiro
P	859/672	970/830	1000/868	1167/1064
L	3,6/2,3	1,35/1,13	2,1/1,8	1,19/0,98
A	187	140	132	103
Ar	8,13	1,15	3,3	0,83
Pe	0,5/30	0,1/30	1,5/10	20/0,5

TABLA I. Dimensiones y parámetros morfológicos medidos en los edificios volcánicos del CFEF, donde la profundidad (P) y la altura (A) se muestran en metros, la longitud (L) y el área (Ar) en kilómetros y km², respectivamente, y la pendiente (Pe) en grados

En la parte NO del CPEF destaca el complejo Hespérides, de 187 m de altura y de forma casi triangular, donde dos de sus lados presentan fuertes pendientes, mientras que el tercero, al NE, termina de forma más suave. Se diferencian dos conos volcánicos principales situados al O del complejo que presentan un perfil asimétrico (Figura 2a y 2e). Los sedimentos muestreados en ellos están formados por contener brecha fangosa con clastos polimícticos de tamaño arena-grava, lo que confir-

ma la naturaleza de estos conos como volcanes de fango. Además, en ellas se detectó una alta abundancia de organismos quimiosimbióticos como los poliquetos frenulados (*Siboglinum* sp.) y el bivalvo *Solemya elarraichensis* (Figura 3).

La parte central del complejo presenta una reflectividad más elevada que el resto del afloramiento y se han obtenido muestras de arena fangosa con fragmentos bioclásticos y de con-

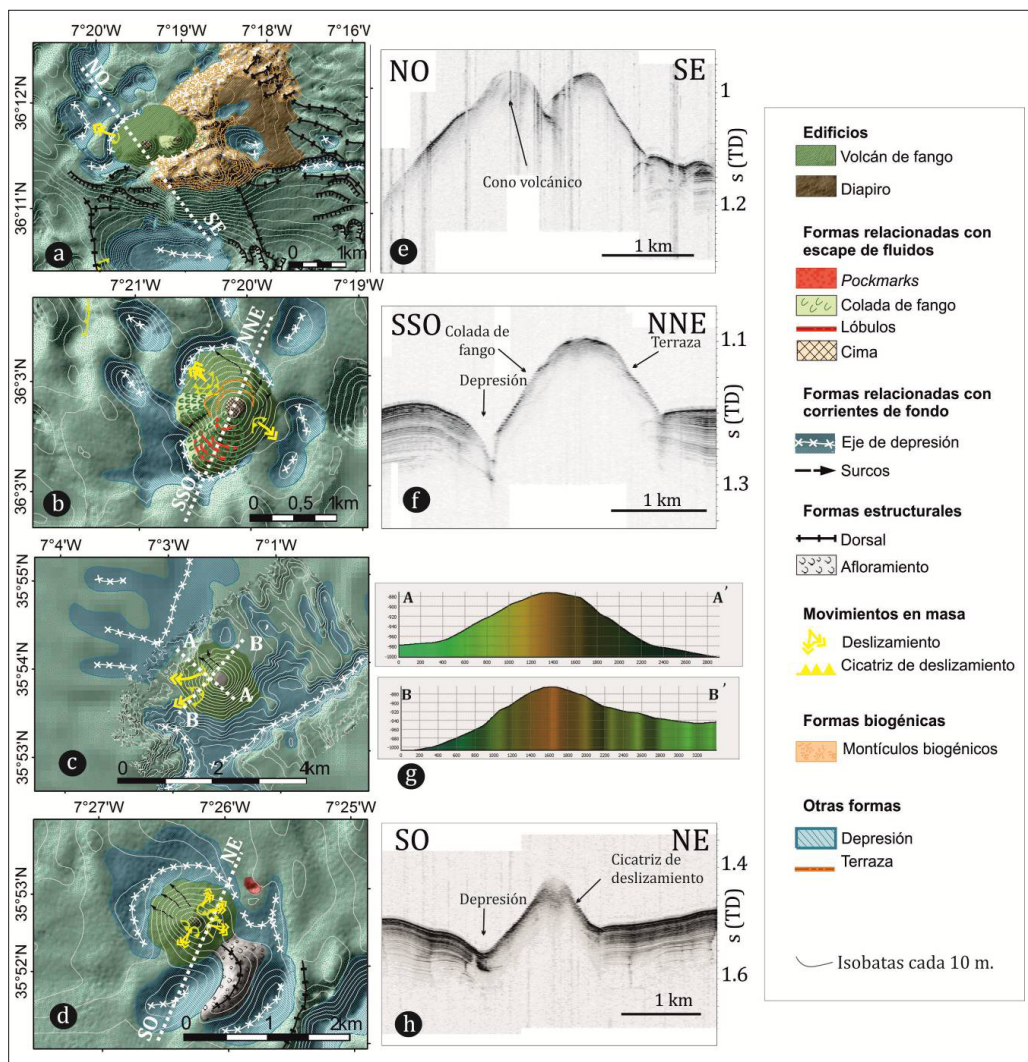


FIGURA 2. Interpretación morfológica representada sobre un mapa de sombras con una resolución de 15x15 m en: a) complejo Hespérides, b) volcán Almazán, c) volcán St. Petersburg, d) volcán Aveiro. Ejemplos de perfiles de muy alta resolución con sonda paramétrica TOPAS (e, f, h) y de perfiles batimétricos (g) indicados en las correspondientes figuras de los edificios

creciones de carbonatos autigénicos en forma de enlosados y chimeneas colonizadas por pequeños octocorales (ej. *Swiftia*, *Acanthogorgia*, *Anthomasthus*) que han permitido interpretar varios montículos y crestas de origen biogénico. El complejo, está rodeado de varias depresiones, destacando la situada al sur de forma ovalada y caracterizada por un fondo plano con elevada pendiente en los bordes. En esta depresión, los sedimentos contienen arena fangosa con acumulaciones de carbonatos autigénicos y su comunidad está dominada por especies de poliquetos, bivalvos y restos de corales de aguas frías (*Madrepora oculata*, *Lophelia pertusa* y *Dendrophyllia alternata*). En las zonas adyacentes al complejo Hespérides se observa un sedimento bastante homogéneo con arena fangosa marrón hemipelágica y menor biodiversidad.

El volcán de fango Almazán, de 140 m de altura, presenta una morfología ligeramente ovalada según el eje NNE-SSO (Figura 2b). Presenta una baja reflectividad, excepto en la cima y en el fondo de las depresiones que lo rodean. La alta reflectividad en la cima podría estar relacionada con una actividad de emisión reciente del volcán. En ella se ha obtenido un testigo de gravedad de 86 cm de longitud que desprendía un intenso olor a sulfhídrico. Los primeros 7 cm están formados por sedimentos hemipelágicos intercalados con brecha fangosa, que predomina hacia la base, y presencia de fauna quimiosimbionte como *Siboglinum* sp. y abundantes restos de *Solemya elarraichensis* (Figura 3). En sus flancos se observan cicatrices de deslizamientos y coladas de fango constituidas por varios lóbulos relacionados con diferentes fases en la extrusión del material fangoso (Figura 2b). Los flancos se encuentran colonizados por especies típicas de sedimentos fangosos, como los pennatuláceos y coral bambú. La base del volcán se encuentra rodeada por varias depresiones constituidas por arena fangosa marrón donde aparecen fragmentos de chimeneas carbonatadas y de corales.

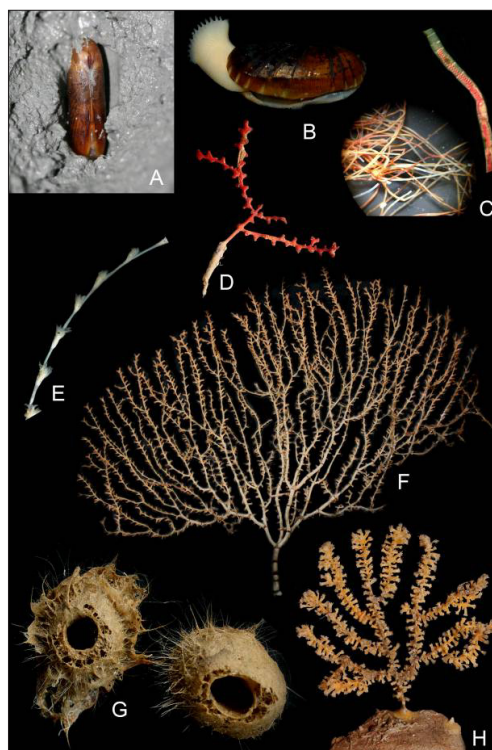


FIGURA 3. Especies tipificadoras de hábitats presentes en los volcanes Hespérides (A,B,D,H), Almazán (A,B,F), St. Petersburgo (A,G) y Aveiro (A,B,E,G). A y B: *Solemya elarraichensis*; C: *Siboglinum* sp.; D: *Swiftia*; E: *Radicipes*; F: *Isidella elongata* (coral bambú); G: *Pheronema carpenteri* y H: *Acanthogorgia*

El volcán St. Petersburgo, con 132 m de altura, se encuentra al SE del CPEF y posee una geometría ligeramente alargada hacia el NE (Figura 2c). Los sedimentos en la cima y el flanco S del volcán son ricos en arena de origen hemipelágico que se deposita sobre brecha fangosa con un fuerte olor a sulfhídrico en la cima y está colonizada por *Siboglinum* sp. El volcán se encuentra rodeado de varias depresiones que se unen formando canales donde abunda el sedimento de tipo arenoso colonizado por pennatuláceos y esponjas hexactinélidas (*Pheronema carpenteri*) (Figura 3). También se han observado dos cicatrices de deslizamientos en sus

flancos, uno en la zona oriental y otro en la occidental.

Finalmente, el volcán de fango Aveiro se localiza al SO en la zona más profunda del CPEF y presenta una altura de 103 m. En la cima se ha obtenido un testigo de gravedad de 80 cm de longitud constituido por 6 cm de sedimentos hemipelágicos superficiales sobre brecha fangosa con un ligero olor a sulfhídrico y con presencia de fauna quimiosimbionte (*Siboglinum* sp, *Solemya elarraichensis* y *Acharax gadirae*) (Figura 3). En sus flancos se observan varias cicatrices de movimientos en masa y surcos erosivos que excavan el volcán hasta la base. En el flanco S, se observan esponjas hexáctinelidas y gorgonias del género *Radicipes* sobre un sedimento con una capa superficial de fango arenoso sobre un fango masivo bastante homogéneo. Está conectado por el SE con un afloramiento diapírico que separa dos depresiones ovaladas con paredes de alta pendiente. Al NE se encuentra una depresión de forma ovalada cuyos diámetros mayor y menor alcanzan una longitud de 225m y 137m, respectivamente (Figura 2d). Su interpretación, por comparación con otros rasgos morfológicos similares presentes en la zona, podría corresponder a un *pockmark* u otro tipo de estructura relacionada con la expulsión de fluidos, encontrándose además relacionada con fallas normales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los principales tipos morfológicos observados en el CPEF se han relacionado principalmente con: a) procesos erosivos, dando lugar a depresiones alargadas por la acción de la corriente de fondo, b) procesos gravitacionales, que producen un desplazamiento preferente de los materiales hacia el SO, c) la tectónica regional, relacionada con la dirección y lineación de las estructuras, y d) estabilidad de los hidratos de gas, que produ-

ce los diferentes tipos morfológicos relacionados con la expulsión de fluidos (Hernández-Molina *et al.*, 2003; García, *et al.*, 2009; León *et al.*, 2010).

La actividad relacionada con la expulsión de fluidos se puede evaluar a través de distintos factores. En los conos volcánicos del CPEF bajo una pequeña capa de sedimentos hemipelágicos se han descrito las facies de brecha fangosa en la columna sedimentaria que, junto con el olor a sulfhídrico y la presencia de especies quimiosimbióticas típica de sedimentos cargados en gas (Ej. *Siboglinum*, *Solemya*), evidencian emisiones activas de fluidos desde el subsuelo. Las coladas de fango y la presencia de diferentes lóbulos en los flancos indican que, durante la formación de los edificios, el proceso de extrusión ha tenido lugar en distintas fases. La presencia de carbonatos autigénicos en los flancos y la base estaría relacionada con emisiones moderadas de fluidos y la acción de corrientes de fondo que pueden desenterrarlos del sedimento donde se forman. Los carbonatos autigénicos proporcionan además el sustrato duro adecuado para el desarrollo de gorgonias (Ej. *Acanthogorgia*, *Swiftia*), entre otros, que necesitan junto con el hidrodinamismo adecuado para su desarrollo. La existencia de depresiones, canales y *pockmarks* en la base de estos edificios también estaría relacionada con procesos de ascenso y expulsión de fluidos y fenómenos de colapso, de manera similar a lo que se ha observado en otras zonas del campo profundo (García *et al.*, 2009; León *et al.*, 2010), y podrían estar sometidas a la posterior acción de las corrientes de fondo como evidencia la presencia de sustratos de textura más gruesa y de fauna bentónica (Ej. *Isidella*, *Radicipes*) relacionada con un mayor hidrodinamismo.

El análisis del conjunto de todas las estructuras y tipos morfológicos descritos, permite conjeturar que el CPEF mantiene una activi-

dad de emisión en la actualidad, aunque las evidencias faunísticas apuntan a que se trata de una actividad moderada que podría ser más activa en la cima de los edificios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución a los proyectos LIFE+ INDEMARES/CHICA y ATLAS (EU Horizon 2020) y al grupo PAIDI de investigación RNM-328. Las actividades de D. Palomino han sido financiadas por el proyecto SUBVENT (CGL2012-39524-C02-01).

REFERENCIAS

- Díaz del Río, V., Bruque, G., Fernández Salas, L.M. *et al.* 2014. *Volcanes de fango del golfo de Cádiz*, Proyecto LIFE+ INDEMARES, 1 – 128. Ed. Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid (España).
- García, M., Hernández-Molina, F.J., Llave, *et al.* 2009. Contourite erosive features caused by the Mediterranean Outflow Water in the Gulf of Cadiz: quaternary tectonic and oceanographic implications. *Marine Geology*, 257(1/4), 24-40.
- Hernández-Molina, F.J., Llave, E., Somoza, L., *et al.* 2003. Looking for clues to paleoceanographic imprints: a diagnosis of the Gulf of Cadiz contourite depositional systems. *Geology*, 31(1), 19-22.
- Hernández-Molina, F.J., Stow, D.A.V., Alvarez-Zarikian, C.A., *et al.* 2014. Onset of Mediterranean Outflow into the North Atlantic. *Science*, 344, 6189, 1244-1250.
- León, R., Somoza, L., Medialdea, *et al.* 2010. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*, 30 (3-4), 231-247.
- Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, *et al.* 2004. Structure and evolution of the “Olistostrome” complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cadiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections. *Marine Geology*, 209, 173–198.
- Milkov, A.V. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167, 29-42.
- Palomino, D., López-González, N., Vázquez, J.T., *et al.* 2015. Multidisciplinary study of mud volcanoes and diapirs and their relationship to seepages and bottom currents in the Gulf of Cadiz continental slope (northeastern sector). *Marine Geology*, doi:10.1016/j.margeo.2015.10.001
- Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., *et al.* 2009. The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1-4), 13-50.